

支撑体对 γ 辐射物探测数据的影响

赵娟¹ 高正明²

1 (荆楚理工学院电子信息工程学院 荆门 448000)

2 (宝鸡高新技术研究所 宝鸡 721013)

摘要 在对大质量高安全性要求的 γ 源进行辐射探测时,发现数据误差很大,不能用于定量分析。为此,基于探测器端面注量率参数理论探讨了地面或支撑台对探测器数据影响的简化计算方法,采用蒙特卡罗方法分析了混凝土支撑体对粒子注量率的影响程度,研究了铅作为次级粒子吸收物质时,铅厚度和半径与注量率测量误差之间的关系。研究表明,在放射性材料辐射探测过程中,为减少混凝土支撑体对辐射探测数据的影响,应采用厚度不小于 0.5 cm、半径不小于源高 3 倍的铅板作为次级粒子吸收体,可将探测数据最大误差由 22%减少至 15%左右,最小可接近 10%,实验结果证实了该方法的有效性。

关键词 支撑体,放射性材料, γ 辐射探测,蒙特卡罗方法

中图分类号 TL81, TL67

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.020401

Influence of the support body on radiation detection for gamma radiator

ZHAO Juan¹ GAO Zhengming²

1(School of Electronics and Information Engineering, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, China)

2(Baoji Research Institute of High Technology, Baoji 721013, China)

Abstract Background: The datum error of the gamma detection on large-mass and high security controlled radioactive materials is too large for quantitative analysis. **Purpose:** This study aims to accurately measure the radiation of gamma radioactive materials placed upon support body. **Methods & Results:** Based on the theory of particle flux parameters on the cross section of detection, the method to calculate the influence of the support body on radiation detection was simplified. Then, simulations were done to find the error distributions with Monte Carlo method when the materials were placed on the concrete ground. In order to reduce the detection error, a plate of lead was recommended to be inserted between the materials and the concrete ground. The best thickness of the lead layer was simulated and experimental verification was performed. **Results:** Simulation results show that if a lead layer thicker than 0.5 cm exists between the radioactive materials and the concrete ground. The relative detection error could be reduced from 22% to 15% or even the least of 10% in some particular situations. **Conclusion:** If a large-mass or high security controlled gamma radiator would be detected, it should be placed on a lead layer thicker than 0.5 cm in case of reducing the datum errors.

Key words Support body, Radioactive material, Gamma radiation detection, Monte Carlo method

由于实际实验条件限制,辐射探测实验数据与理论真值之间存在着偏差,偏差的数值大小决定着实验数据的可信程度,估算辐射探测数据偏差是数

据处理与分析的重要组成部分,在核技术应用研究中具有重要的地位。

国防预先研究项目基金(No.51331040501)资助

第一作者:赵娟,女,1979年出生,2009年于华中科技大学获硕士学位,研究领域为通信系统盲均衡技术和无损检测与监控技术

Supported by National Defense Pre-research Projects (No.51331040501)

First author: ZHAO Juan, female, born in 1979, graduated from Huazhong University of Science and Technology with a master's degree in 2009, focusing on the blind equalization, the non-destructive testing and monitoring technologies

收稿日期:2015-10-12,修回日期:2015-12-16

辐射探测数据与真值之间的偏差来源于多个方面,如探测器自身性能、辐射粒子特性和实验环境因素等。在探测器制造过程中,对晶体进行表面工艺处理有助于提升探测器性能,如晶体表面光滑与蚀刻工艺处理等^[1-2]。在辐射探测数据处理过程中,实验仪器已经选定,因此人们对实验环境条件的影响更为关注。Bartlett等^[3]研究了盐沉积对 α 放射性气溶胶连续监测仪的影响,指出由于沉积盐层对 α 粒子的阻止作用, α 放射性活度的探测精度将会降低;陈凌等^[4]研究了大气压强或空气密度对固体核径迹探测器刻度系数的影响,得出大气压强降低或空气密度增大可导致核径迹探测器刻度系数增大17%到31%不等的结论。此外,人们还研究了探测目标的输运与运动状态的影响程度,顾行发等^[5]根据辐射在地表一大气界面的反射和折射性质,采用相对误差因子定量分析了地表反射类型变化对辐射矢量的影响,认为地表反射对光辐射的影响较大,数据处理需要考虑地表的方向反射特性和自然界的偏振效应;税举等^[6]用蒙特卡罗方法研究了放射性材料移动对辐射探测阵列探测质量下限的影响,推论在600 cm距离,探测匀速移动时的放射性材料下限比静止的下限大一倍。

实际放射性材料辐射探测过程中,出于安全性考虑,质量较大、辐射较强或不能移动等原因,有时不能将源吊于空中^[7]进行辐射探测,而只能通过限定的操作将源放置于地面或工作台上^[8]。此时,地面或工作台物质与辐射粒子相互作用,散射或产生的次级粒子对探测数据有一定的影响。为此,本文采用蒙特卡罗方法分析放射性材料放置于混凝土地面上时的 γ 辐射探测数据误差,并采用常用的铅屏蔽材料作为次级粒子吸收体,计算铅层厚度与覆盖面尺寸与探测数据误差之间的关系。通过改变辐射探测环境减少数据偏差,为特定条件下放射性材料辐射特性参数测量提供技术支撑。

1 影响机理分析

1.1 原理分析

γ 粒子与物质相互作用的主要形式是光电效应、康普顿效应和电子对生成效应等。当 γ 粒子能量较

低时, γ 粒子主要与原子壳层轨道上的内层电子碰撞产生光电子;当 γ 粒子能量较高时,一部分 γ 粒子与自由电子发生碰撞,将一部分能量转移给电子,而自身能量和运动方向发生改变;当 γ 粒子能量大于1.022 MeV时,一部分 γ 粒子经过原子核附近时在库仑电场的作用下转换成一对正、负电子。次级电子通过电离和激发、韧致辐射将能量传给原子或转换为光子,直至能量完全被物质吸收或逃逸。

在放射性材料的 γ 辐射探测实验中,到达探测器的粒子来源有:(1)源发射出的未与物质发生相互作用的粒子;(2)源粒子与其它粒子碰撞后改变方向到达的源辐射粒子;(3)源粒子与物质相互作用产生的各级电子在空气或支撑体中韧致辐射产生的光子;(4)源粒子与物质相互作用产生的各级正电子湮灭光子;(5)源粒子与物质相互作用产生的其它如瑞利散射效应产生的光子;(6)环境本底。这些粒子中只有(1)是期望测量的。

1.2 地面或支撑台影响程度的数值分析

地面或支撑台与源粒子相互作用,产生的次级产物随着远离源距离的增大而减弱。假定柱源源强 A ,半径 R ,高 H ,各向同性。以柱源与地面或支撑台接触的圆面中心为原点,中心垂线为 Y 轴,建立直角坐标系。忽略圆柱截面粒子作用,则该柱源放置于地面或支撑台上时, X 轴上任一点 $(x_0,0,0)$ 能够接收来自于源圆柱面 Σ 部分的粒子:

$$\Sigma: \begin{cases} x^2 + z^2 = R^2 \\ 0 \leq y \leq H \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

曲面 Σ 上的任一点 (x,y,z) 邻域 dS 在点 $(x_0,0,0)$ 的粒子注量率为:

$$d\Phi(x_0) = \frac{A \cdot dS}{8\pi^2 R \cdot H \cdot [(x-x_0)^2 + y^2 + z^2]} \quad (2)$$

根据轴对称性和式(1),对式(2)进行曲面积分,可得:

$$\Phi(x_0) = \frac{A}{4\pi^2 R \cdot H} \int_0^R \frac{1}{\sqrt{R^2 + x_0^2 - 2x_0\sqrt{R^2 - z^2}} \sqrt{R^2 - z^2}} \cdot \arctg \frac{H}{\sqrt{R^2 + x_0^2 - 2x_0\sqrt{R^2 - z^2}}} \cdot dz \quad (3)$$

式(3)可根据积分的数值求解法进行求解,如图1所示。

若忽略次级粒子角分布和能量分布规律的影响,认为地面或支撑台与源粒子相互作用的次级光子注量率正比于源粒子在该点的注量率,并以各向

同性分布被探测器探测，此时探测器的几何因子可采用蒙特卡罗方法进行计算，抽样点 $(x, 0, z)$ 满足：

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + z^2} \geq R \\ p(\rho) = \Phi(\rho) \end{cases} \quad (4)$$

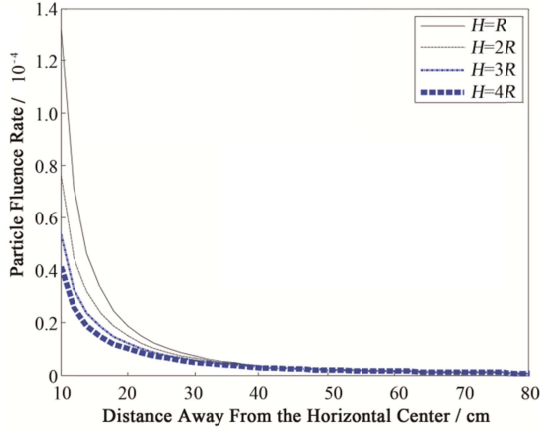


图1 理想条件下粒子注量率分布
Fig.1 Ideal distribution of the particle fluence rate.

探测器截面半径 r ，截面圆表征曲线：

$$\begin{cases} x=a \\ (y-b)^2 + (z-c)^2 = r^2 \end{cases} \quad (5)$$

以概率 $p=k \cdot \Phi(x)$ （其中 k 为比例系数，用于表征次级粒子注量率与源粒子注量率的比值）模拟抽样 N 个粒子，飞行至 $x=a$ ， $(y-b)^2 + (z-c)^2 \leq r^2$ 的粒子数 C ，则探测器几何因子 $\eta=C/N$ 。

位于 $x=a$ 处的探测器，地面或支撑台次级产物对其探测数据的贡献可简单表征为：

$$\Phi_D = \eta \int_0^a k \cdot \Phi(\rho) d\rho \quad (6)$$

即地面或支撑台的存在使探测器注量率测量值增大了 Φ_D 。

实际上，源粒子与地面或支撑台物质相互作用形式复杂，次级产物与物质的作用形式多样，且数学解析难度大，因此地面或支撑台对源探测真值的影响一般采用数值方法进行分析。

2 影响程度与对策分析

2.1 仿真环境与模型

MCNP 程序是常用的粒子输运计算软件之一，可用于处理多种粒子的输运计算，本文基于 MCNP5 对 γ 粒子输运过程进行数值仿真分析。仿真分析过程中采用两种计算模型：一是放射性材料自由位于

计算空间，周边环境为真空或空气(图 2)，可用于理想条件下粒子通过真空或空气环境后到达探测器真值的数值分析；二是无限厚混凝土基础支撑，放射性材料位于混凝土或支撑板上(图 3)，用于计算空旷区域放射性材料放置于地面或地面支撑板上时的探测器计数。测量对象为 ^{60}Co 圆柱源，该源发射 1.17 MeV (99.85%)、1.332 MeV (99.98%)两种能量的 γ 粒子。

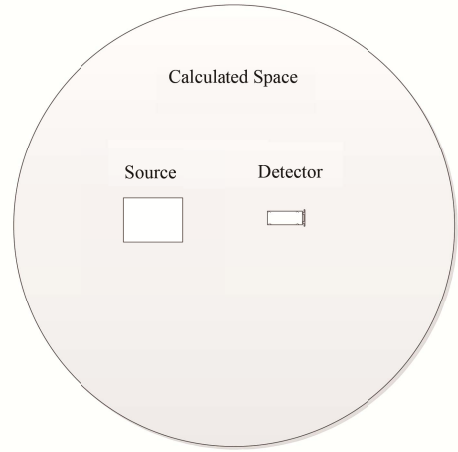


图2 理想测量环境示意图
Fig.2 Ideal test space.

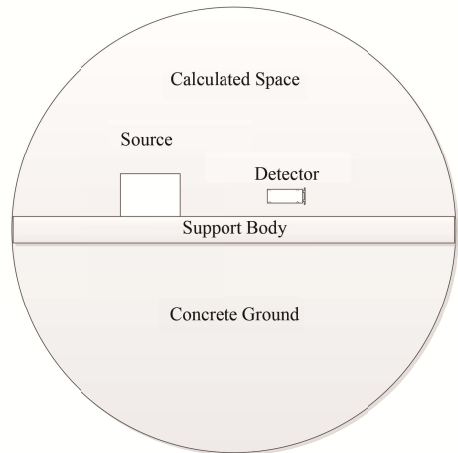


图3 实际测量环境示意图
Fig.3 Real test space.

2.2 混凝土地面支撑时 γ 辐射探测数据误差分析

采用探测器前端面 γ 粒子注量率进行评价^[9]，由图 2 模型仿真得到探测器前端面注量率真值和空气环境的影响程度，采用图 2 模拟放射性材料放置于地面或支撑的情况，结果如图 4、5 所示。

可见，理想条件下，探测器前端面粒子注量率受空气的影响较弱，空气介质的存在对粒子注量率的影响不大于 5%。当放射性材料放置于地面时，

源粒子与混凝土物质成分相互作用, 产生了大量的次级粒子, 使探测器前端面注量率受到显著影响, 仿真 10–400 cm 探测器前端面粒子注量率, 平均偏差 16.6%, 最大偏差可达 22%。随着探测器逐渐远离放射源, 计数误差先增大后减小(图 4), 这是因为当两者之间距离较小时, 随着探测器远离源物质, 探测器对混凝土地面所张立体角逐渐增大, 放射源发出的 γ 粒子与混凝土相互作用产生的次级 γ 粒子和散射粒子到达探测器前端面的量增多; 当探测器与放射源足够远时, 能量较小的次级 γ 粒子被吸收或散射, 不能到达探测器, 同时探测器对次级粒子较多的近源区域所张的立体角减小, 因此到达探测器前端面的粒子越来越多地来自于放射源, 使探测器前端面粒子注量率更接近真实值。

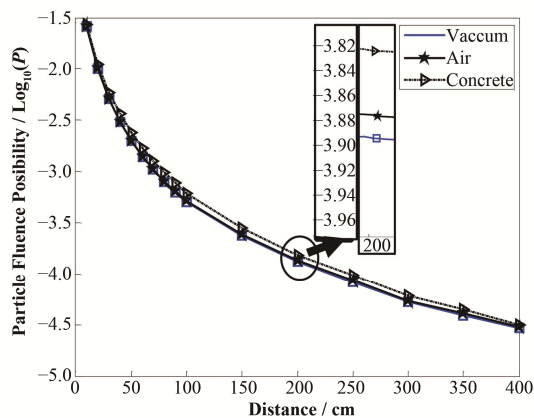


图 4 前端面 γ 粒子注量率与测量距离的关系
Fig.4 The γ fluence rate on the front plate of the detectors vs. distances.

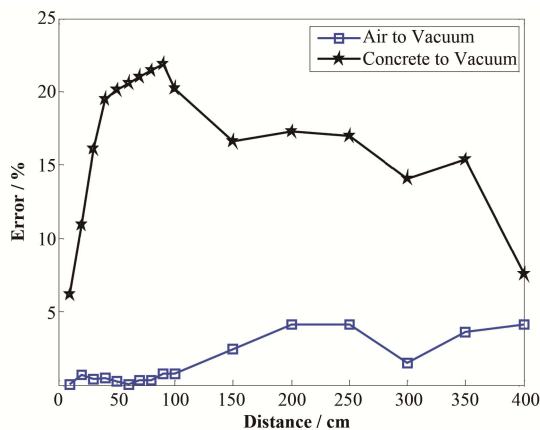


图 5 实际探测环境中注量率误差与距离的关系
Fig.5 Error of the fluence rate vs. distances.

可见, 当特定条件下放射性材料只能放置于地面(或工作台)上进行辐射探测时, 混凝土地面对 γ 辐射探测数据的影响很大。此时必须考虑地面或支撑体对辐射探测数据的影响, 采取措施降低数据

偏差。

2.3 分析与对策

由前述分析可知, 测量放射性材料时, 空气介质对探测数据的影响较小, 测量偏差主要来源于源粒子与地面支撑体的相互作用产生的次级粒子的贡献。因此, 若采用一层 γ 粒子吸收层, 尽可能减少到达地面或支撑体的 γ 粒子散射产物或其与支撑体相互作用产生的次级产物到达探测器, 就可有效减少探测误差。

铅是常用的 γ 粒子屏蔽材料, 可通过加工制作一定厚度的铅板放置于放射性材料与地面之间, 吸收放射性材料发射向地面的粒子, 减少非期望粒子对探测数据的贡献, 降低辐射探测误差^[10]。仿真计算时在放射性材料与地面间放置一层铅板, 其厚度分别为 0.2–1.0 cm 不等, 随着铅层厚度的不同, 探测器前端面注量率相对于真空状态数据的偏差也不同, 结果如图 6、7 所示。

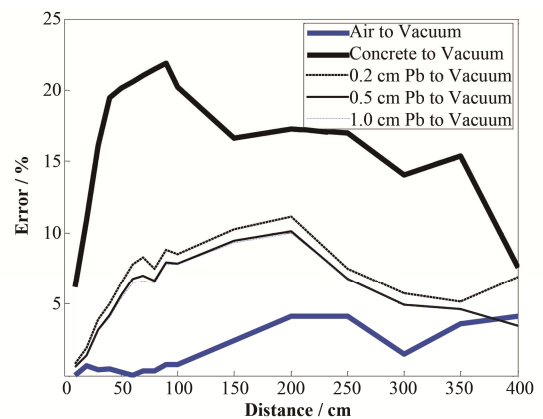


图 6 探测器前端面注量率误差分布
Fig.6 Particle fluence rate errors on the front plate of the detector.

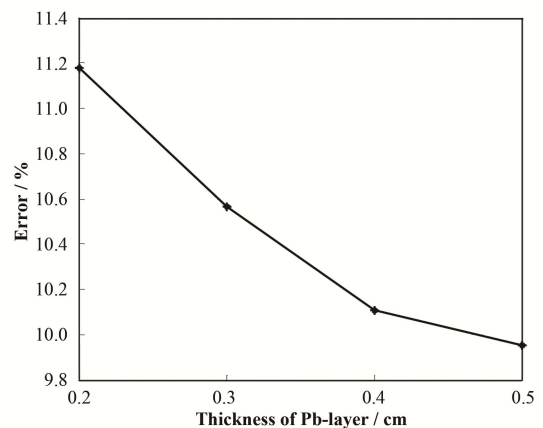


图 7 铅板厚度与 200 cm 处探测器前端面注量率误差分布
Fig.7 Fluence rate errors on the front plate of the detector at 200 cm vs. Pb-layer thickness.

随铅层厚度的增大, 入射向地面的源粒子更多地被铅层吸收, 因此相应计数比无铅层时的数据更接近真值, 但由于铅本身也和 γ 粒子发生相互作用, 产生散射光子或次级光子, 因此添加铅吸收层并不能完全消除误差。需要注意的是, 当铅层能够完全吸收混凝土地面产生的次级光子时, 再增大铅层厚度已经无明显效果了。

铅的密度很大, 会导致中毒, 因此实际使用时应尽量减少铅的用量, 据图 6、7 结果可选择 0.5 cm 厚度的铅层作为吸收层。因 200 cm 处探测数据误差最大, 以该点为参考, 分析铅层覆盖面与 200 cm 处探测器前端面注量率误差之间的关系, 如图 8 所示。

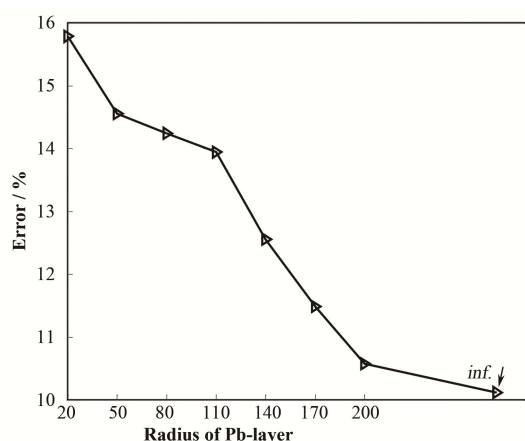


图 8 不同铅板半径时探测器前端面注量率误差分布
Fig.8 Fluence rate errors vs. radius of the Pb-layer.

由图 8 可知, 随着铅板半径的增大, 200 cm 处探测器前端面注量率误差逐渐下渐, 下降速度先增大后减小。因此, 在条件许可时, 可将源和探测器全部采用铅板支撑, 以减少次级粒子的影响, 此时探测器前端面粒子注量率误差可减少于 10.1%; 铅量不足时, 至少应确保源高 3 倍以上吸收层半径, 此时前端面粒子注量率误差仍然较大, 但再小幅度增加覆盖面尺寸 (铅板半径在源高 3–6 倍之间) 时的性价比较差。

2.4 实验验证

为验证仿真分析结果, 采用澳大利亚 Canberra 公司生产的 Inspector 1000 γ 探测器对放置于室外开阔区的 ^{137}Cs 源进行实验测量。加工了 3 个 100 cm×100 cm×0.3 cm 的铅板, 放置于源和混凝土地面之间, 分别测量源放置于混凝土地面、0.3 cm、0.6 cm、0.9 cm 铅板时, 离源 100–300 cm 之间间隔 20 cm 不同位置处的 γ 剂量率数值。测量结果如图 9 所示。

该 ^{137}Cs 源标定于 1991 年, 长期使用后活度变

化情况未知, 因此实验中未计算相对误差, 但实验数据分布和仿真数据具有较强的相似性, 0.6 cm 厚度铅屏蔽后的辐射探测数据已显著降低了误差, 证实了本文分析结果。

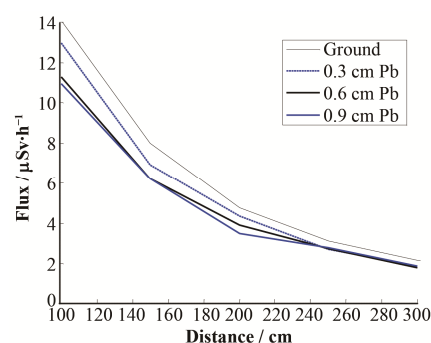


图 9 实验探测数据
Fig.9 Experimental results.

3 结语

据实际放射性材料辐射探测需求, 本文以 ^{60}Co 圆柱源为分析对象, 采用探测器朝向源的前端面的粒子注量率为特征参数, 基于蒙特卡罗方法分析了实际探测环境对源探测数据的影响。研究结果表明: (1) 在不考虑支撑的情况下, 空气环境对 γ 粒子注量率的影响较少, 与真空状态数据相比偏差不大于 5%; (2) 实际测量中, 位于混凝土地面的源的 γ 辐射探测误差较大, 与真空状态数据相比, 平均偏差 16.6%, 最大误差达 22%, 数据可信度低; (3) 采用 0.5 cm 厚的铅板可有效降低混凝土地面的影响, 为获得更好的效果, 板半径应尽量包围源和探测器, 至少应大于源高 3 倍; (4) 测量误差先增大后减少, 以本文仿真设定, 增大铅板覆盖面, 可将探测数据最大误差降低至 15% 左右, 随铅板覆盖面的进一步增大, 理论上最大误差可减少至 10.1%。

数值分析结果表明, 采用一定厚度的铅板可显著减少源粒子与地面混凝土成分相互作用产生的次级粒子的影响。因此, 在特定条件下, 当放射性材料只能放置于地面或工作台上进行 γ 辐射探测时, 在源与地面或工作台之间添加一层厚度不小于 0.5 cm 的铅板, 可显著提高测量准确度。

参考文献

- Oliveira I B, Costa F E, Brazil S P, *et al.* Influence of crystalline surfaces on the TlBr radiation detector performance[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, 52(5): 2058–2062. DOI: 10.1109/TNS.2005.56788
- Zheng Q, Dierre F, Crocco J, *et al.* Influence of surface

- preparation on CdZnTe nuclear radiation detectors[J]. Applied Surface Science, 2011, **257**(20): 8742–8746. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.05.098
- 3 Bartlett W T, Walker B A. The influence of salt aerosol on alpha radiation detection by WIPP continuous air monitors[A]. 24th DOE/NRC nuclear air cleaning and treatment conference[C]. Oregon, Portland: The Harvard Air Cleaning Laboratory, 1997: 188–199. DOI: 10.2172/179208
 - 4 陈凌, 刘森林, 武奕华, 等. 固体核径迹氡探测器刻度系数及其受大气压强影响的蒙特卡罗模拟计算[J]. 原子能科学技术, 2004, **38**(1): 74–78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2004.01.015
CHEN Ling, LIU Senlin, WU Yihua, *et al.* Monte Carlo computation of the calibration factor of solid state nuclear track detector for radon and the effect by atmospheric pressure[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, **38**(1): 74–78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2004.01.015
 - 5 顾行发, 程天海, 余涛, 等. 地表双向反射对天基矢量辐射探测的影响分析[J]. 物理学报, 2009, **58**(10): 7368–7375. DOI: 10.7498/aps.58.7368
GU Xingfa, CHENG Tianhai, YU Tao, *et al.* Effect of surface reflectances on the space-based vector radiative detection[J]. Acta Physica Sinica, 2009, **58**(10): 7368–7375. DOI: 10.7498/aps.58.7368
 - 6 税举, 何彬, 付广智, 等. 核材料移动对辐射探测器阵列探测下限影响的蒙特卡罗模拟[J]. 原子能科学技术, 2007, **41**(4): 497–500. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2007.04.024
SHUI Ju, HE Bin, FU Guangzhi, *et al.* Monte-Carlo simulation of movement of nuclear matter influencing on minimum detectable limit of radiation detector array[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, **41**(4): 497–500. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2007.04.024
 - 7 蒋诗平. ²⁴¹Am-Be 中子源快中子成像研究[J]. 同位素, 2007, **20**(2): 87–90. DOI: 10.7538/tws.2007.20.02.0087
JIANG Shiping. Fast neutron imaging using ²⁴¹Am-Be neutron source[J]. Journal of Isotopes, 2007, **20**(2): 87–90. DOI: 10.7538/tws.2007.20.02.0087
 - 8 Lu Z Y, Gao L, Peng G X. Density isomer of nuclear matter in an equivalent mass approach[J]. Nuclear Science and Techniques, 2013, **24**(5): 050505. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.24.050505
 - 9 胡广春, 郝樊华, 刘素萍, 等. 钚体源样品 γ 能谱计算的蒙特卡罗方法[J]. 物理学报, 2005, **54**(8): 3523–3529. DOI: 10.7498/aps.54.3523
HU Guangchun, HAO Fanhua, LIU Suping, *et al.* Monte-Carlo method in calculating the γ spectrum of plutonium volume source[J]. Acta Physica Sinica, 2005, **54**(8): 3523–3529. DOI: 10.7498/aps.54.3523
 - 10 Ochbelagh D R, Azimkhani S, Mosavinejad H G. Gamma-ray shielding properties of concrete with different percentages of lead[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, **23**(4): 215–218. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.23.215–218